



IN THE UNITED STATES PATENT AND TRADEMARK OFFICE

In re application of: Ryuzo OHMUKAI et al.

Serial Number: 10/776,341

Filed: February 12, 2004

For: ATOMIC LITHOGRAPHY APPARATUS USING ELECTRO-OPTIC EFFECT AND  
METHOD OF MANUFACTURING ATOMIC STRUCTURE

Attorney Docket No.: 042042

Customer No.: 38834

**CLAIM FOR PRIORITY UNDER 35 U.S.C. 119**

Commissioner for Patents  
P. O. Box 1450  
Alexandria, VA 22313-1450  
Sir:

June 23, 2004

The benefit of the filing date of the following prior foreign application is hereby requested for the above-identified application, and the priority provided in 35 U.S.C. 119 is hereby claimed:

**Japanese Appln. No. 2003-035356, filed on February 13, 2003**

In support of this claim, the requisite certified copy of said original foreign application is filed herewith.

It is requested that the file of this application be marked to indicate that the applicants have complied with the requirements of 35 U.S.C. 119 and that the Patent and Trademark Office kindly acknowledge receipt of said certified copy.

In the event that any fees are due in connection with this paper, please charge our Deposit Account No. 50-2866.

Respectfully submitted,  
WESTERMAN, HATTORI, DANIELS & ADRIAN, LLP

Scott M. Daniels  
Reg. No.: 32,562

1250 Connecticut Avenue, N.W., Suite 700  
Washington, D.C. 20036  
Tel: (202) 822-1100  
Fax: (202) 822-1111  
SMD/ll

日本国特許庁  
JAPAN PATENT OFFICE

別紙添付の書類に記載されている事項は下記の出願書類に記載されている事項と同一であることを証明する。

This is to certify that the annexed is a true copy of the following application as filed with this Office.

出願年月日  
Date of Application: 2003年 2月13日

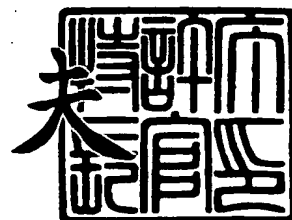
出願番号  
Application Number: 特願 2,003-035356  
[ST. 10/C]: [JP 2003-035356]

出願人  
Applicant(s): 独立行政法人通信総合研究所

2004年 1月13日

特許庁長官  
Commissioner,  
Japan Patent Office

今井 康



出証番号 出証特 2003

【書類名】 特許願

【整理番号】 P02-0151

【提出日】 平成15年 2月13日

【あて先】 特許庁長官 殿

【国際特許分類】 H01L 21/07  
G03F 7/20

【発明者】

【住所又は居所】 東京都小金井市貫井北町 4 - 2 - 1 独立行政法人通信  
総合研究所内

【氏名】 大向 隆三

【発明者】

【住所又は居所】 東京都小金井市貫井北町 4 - 2 - 1 独立行政法人通信  
総合研究所内

【氏名】 渡辺 昌良

【特許出願人】

【識別番号】 301022471

【氏名又は名称】 独立行政法人通信総合研究所

【代理人】

【識別番号】 100092783

【弁理士】

【氏名又は名称】 小林 浩

【電話番号】 03-3273-2611

【選任した代理人】

【識別番号】 100095360

【弁理士】

【氏名又は名称】 片山 英二

## 【選任した代理人】

【識別番号】 100093676

【弁理士】

【氏名又は名称】 小林 純子

## 【選任した代理人】

【識別番号】 100116850

【弁理士】

【氏名又は名称】 廣瀬 隆行

## 【提出物件の目録】

【物件名】 明細書 1

【物件名】 図面 1

【物件名】 要約書 1

【包括委任状番号】 0203751

【ブルーフの要否】 要

【書類名】 明細書

【発明の名称】 電気光学効果を利用した原子リソグラフィー装置、及び原子構造物の製造方法。

【特許請求の範囲】

【請求項 1】

原子ビームに含まれる原子を基板上に堆積させ原子構造物を製造するための原子リソグラフィー装置において、

ピンホールを有する原子オープンと、

前記原子オープンから放出された原子気体をコリメートし、原子ビームとするピンホールを有するコリメータと、

前記原子ビームにレーザーを照射し、原子ビームの広がり角を制御する 4 本のレーザーと、

前記原子ビームが進行する空間の一部に光定在波を形成し、原子ビームの進行方向を制御する 2 本のレーザーと、

前記原子ビームの進行方向を制御するレーザーの位相を制御し、原子ビームの進行方向を制御する電気光学素子と、

前記電気光学素子に加える電圧を制御し、前記電気光学素子の屈折率を制御する電気光学素子駆動装置と、

前記電気光学素子駆動装置を制御する制御装置と、

を具備する原子リソグラフィー装置。

【請求項 2】

原子ビームを遮断するためのシャッターを含む請求項 1 に記載の原子リソグラフィー装置。

【請求項 3】

前記原子ビームの進行方向を制御するレーザーが、原子ビームの進行方向に垂直で、かつ互いに直交する 2 つのレーザーからなる請求項 1、又は請求項 2 に記載の原子リソグラフィー装置。

【請求項 4】

原子ビームを発生させる原子ビーム発生工程と、

電気光学効果を用いてレーザーによる光定在波を制御し、前記の原子ビームの進行方向を制御する工程と、

を含む基板上への原子構造物の製造方法。

**【請求項 5】**

前記原子ビーム発生工程は、

原子オープンにより原子を蒸発させる原子気体発生工程と、

前記原子気体を 1 つ又は 2 つ以上のピンホールを通すことによりコリメートし、コリメートされた原子気体にレーザーを照射することにより原子気体の広がり角を  $1 \text{ mrad}$  以下とする原子ビーム取得工程と、

を含む請求項 4 に記載の基板上への原子構造物の製造方法。

**【請求項 6】**

原子ビームの進行方向に対して垂直な面に互いに直交する 2 本のレーザーを用意し、

前記光定在波を、電気光学素子を経た前記 2 本のレーザーにより得、

前記電気光学素子の屈折率を制御することにより、

前記光定在波を変化させることにより原子ビームの進行方向を制御する請求項 4 に記載の基板上への原子構造物の製造方法。

**【請求項 7】**

気体原子からなる原子ビームを生成する原子ビーム生成手段と、

前記原子ビーム生成手段により生成された原子ビームにレーザーを照射し、原子ビームの広がり角を制御する 4 本のレーザーと、

前記原子ビームが進行する空間の一部に光定在波を形成し、原子ビームの進行方向を制御する 2 本のレーザーと、

前記原子ビームの進行方向を制御するレーザーの位相を制御し、原子ビームの進行方向を制御する電気光学素子と、

前記電気光学素子に加える電圧を制御し、前記電気光学素子の屈折率を制御する電気光学素子駆動装置と、

前記電気光学素子駆動装置を制御する制御装置と、

を具備する原子リソグラフィ装置。

**【発明の詳細な説明】****【0 0 0 1】****【発明の属する技術分野】**

この発明は、基板上にパターンを形成する微細パターンの形成方法、および原子リソグラフィー装置に関し、特に原子あるいは分子の運動をレーザーによって制御し基板上へ堆積させることにより微小な構造物を作成する技術（原子リソグラフィー）において、所望の微細パターンを基板上に自由に描き、かつ光の回折限界以下程度の高い描画分解能を有する原子リソグラフィーに関するものである。

**【0 0 0 2】****【従来の技術】**

縮小光学系を用いて、サブミクロン領域のパターンを形成することは、半導体集積回路の製造に広く用いられている。この方法では、微細パターンを形成する物体の表面に感光性レジスト剤を塗布し、縮小光学系を用いて微細パターンを焼き付けた後、上記の感光性レジスト膜をエッチングマスクとして、上記の物体の表面をエッチングし、必要で無くなった感光性レジスト膜を除去して、望みの微細パターンを形成する、というプロセスが用いられている。この方法では、感光性レジスト膜を用いることから、これに含まれる微量の不純物が、上記の微細パターンを形成する物体の表面に拡散し、その電気特性に影響を与えるという欠点があった。また、微細パターンを描く方法として、縮小光学系を用いて一括露光する他に、細く絞った電子線を用いて描画する事も行われている。しかし、この方法は、電子線集束時に電子間の反発（クーロン相互作用）が描画分解能を制限してしまううえに、やはり一般に感光性レジスト剤が用いられるため、上記の場合と同じ問題があった。

**【0 0 0 3】**

また、最近では、光の定在波と電氣的に中性な原子との相互作用を用いた方法が注目されている（例えば下記非特許文献 1（G.Timp, et al., "Using Light as a Lens for Submicron, Neutral-Atom Lithography", Phys. Rev. Let., 69, 1636-1639, 1992）参照。）。下記非特許文献 1 には、特にその F i g. 1 に示される

構成で、波長589nmのレーザーを用いて、直径300  $\mu$ m程度の定在波を形成し、その光線の方向と直角の方向に、平均速度が740 m/sと低速な原子線を通すことにより、縞状の紋様を基板上に描画し、その線幅を10nm以下に狭窄化できる見通しが記載されている。

#### 【0004】

また、下記非特許文献2 (A.S.Bell, et al., "Atomic Lithography", Microelectronic Engineering 41/42, 587-590, 1998) には、特に下記非特許文献2のFig. 1 (a) に示される構成で、2枚の反射板と425nmのレーザーを用いて格子状の紋様を持った定在波を発生させることにより、用いた光の波長の2/3の周期(283.7nm)の格子点群を生成した旨が報告されている。この際、クロム原子線を発生させ、レーザー冷却法を用いて運動方向が平行化された原子線とし、クロム原子の共鳴遷移を引き起こす波長に近い波長のレーザーを用いている。

#### 【0005】

良く知られている様に、原子の共鳴遷移波長よりも長い波長を持つ不均一な光強度分布のレーザーを使用した場合、原子はその光の場の中で光強度の大きい領域に向かう力を受ける。逆に共鳴遷移波長よりも短い波長のレーザーの場合は、原子はレーザー強度の小さい領域へ向かう力を受ける。上記の文献2においては、この特性を用いて、シリコン基板上に、上記のパターンを形成しており、感光性レジスト剤が用いられていないため、汚染されにくいという利点がある。

#### 【0006】

図1に従来の微小パターンの形成方法の一例を示す(下記特許文献1(特開2002-75825号公報)参照)。

図1は、真空チャンバー100内で行なう従来の原子リソグラフィーの一例を示す模式図である。まず、リソグラフィーにおいて使用する物質をオープン10中に入れ、加熱し物質を蒸発させる。この蒸発気体を、蒸発した原子の飛散する方向と同軸上に並べた2個のピンホール(第1のピンホールはオープンに、第2のピンホールはコリメータ2に与えられている)を用いてコリメートし、こうしてできた原子群により、熱原子ビームを発生させる。

#### 【0007】



この熱原子ビームの原子のもつ速度は広い分布を持っているため、良く知られた光の散乱力で原子を減速するか、速度選別することによって、例えば、原子の速度が 5 m/s 以下になるまで減速する。

#### 【0 0 0 8】

こうして得られた減速原子ビームを原子源として磁気光学トラップ (MOT) に原子を捕獲すると同時にレーザー冷却操作を施して、運動エネルギーを温度 1 mK 相当以下にまで冷却する。MOT はアンチヘルムホルツ型コイル 5 とレーザー 6 によって構成する。コイル 5 は真空槽の内側あるいは外側のどちらに配置してもよいが、これによって生じる磁場勾配は 1 mT/cm 程度となるようコイルに電流を流す。MOT 用レーザーは真空槽外からビューポートを通じて 6 方向 ( $\pm x$ 、 $\pm y$ 、 $\pm z$ ) から入射させる。

#### 【0 0 0 9】

原子集団が MOT に捕獲され、十分に冷却されると、MOT に使用するレーザーの照射を中断し、冷却原子群 3 を重力に従って約 10 cm 自然落下させる。この距離を制御して、原子の運動エネルギーを制御する。この際、冷却原子は重力方向に沿って垂直に落下する様に配置する。

#### 【0 0 1 0】

このときの四重極磁場は、4 本の銅ロッド (長さ 10 cm) を等間隔 (10 mm) に図 1 の様に配置し、互いに逆向き電流を流して最大磁場 = 15 mT (磁場勾配 30 mT/cm) 程度磁場を発生させ、落下する冷却原子が横方向 (落下する方向と垂直な面内の方向) への散逸を防ぎ、原子の高密度化を図るための磁気トラップとする。

#### 【0 0 1 1】

基盤 1 上で描画を行ないたい 2 次元的空间パターンから計算によってホログラム (透過性) を作成する。

#### 【0 0 1 2】

#### 【特許文献 1】

特開 2 0 0 2 - 7 5 8 2 5 号公報

#### 【非特許文献 1】

G.Timp, et al., "Using Light as a Lens for Submicron, Neutral-Atom Lithography", Phys. Rev. Lett., 69, 1636-1639, 1992

【非特許文献 2】

A.S.Bell, et al., "Atomic Lithography", Microelectronic Engineering 41/42, 587-590, 1998

【0 0 1 3】

【発明が解決しようとする課題】

しかし、従来の微細パターンの形成方法では、上記の非特許文献 1、非特許文献 2 に示されているように縞状や格子状の紋様は実現されているが、定在波を用いているため、今後改善されるにしても、多角形程度の簡単な図形を描画することが限界である。

【0 0 1 4】

この発明は上記に鑑み提案されたもので、上記の従来の方法と同様に、光と原子の相互作用を用いているが、光の回折限界以下程度の高い分解能を有する原子リソグラフィー技術を提供し、自由なパターンを一括して描画することができる微細パターンの形成方法を提供することを目的とする。

【0 0 1 5】

【課題を解決するための手段】

上記課題の少なくともひとつは、以下の発明により解決される。

(1) 本発明の第 1 の発明は、原子ビームに含まれる原子を基板上に堆積させ原子構造物を製造するための原子リソグラフィー装置において、ピンホールを有する原子オープンと、前記原子オープンから放出された原子気体をコリメートし、原子ビームとするピンホールを有するコリメータと、前記原子ビームにレーザーを照射し、原子ビームの広がり角を制御する 4 本のレーザーと、前記原子ビームが進行する空間の一部に光定在波を形成し、原子ビームの進行方向を制御する 2 本のレーザーと、前記原子ビームの進行方向を制御するレーザーの位相を制御し、原子ビームの進行方向を制御する電気光学素子と、前記電気光学素子に加える電圧を制御し、前記電気光学素子の屈折率を制御する電気光学素子駆動装置と、前記電気光学素子駆動装置を制御する制御装置と、を具備する原子リソグラフィ

一装置である。

(2) 本発明の第1の発明は、好ましくは、原子ビームを遮断するためのシャッターを含む。

(3) 本発明の第1の発明は、好ましくは、前記原子ビームの進行方向を制御するレーザーが、原子ビームの進行方向に垂直で、かつ互いに直交する2つのレーザーからなる。

(4) 本発明の第2の発明は、原子ビームを発生させる原子ビーム発生工程と、電気光学効果を用いてレーザーによる光定在波を制御し、前記の原子ビームの進行方向を制御する工程と、を含む基板上への原子構造物の製造方法である。

(5) 本発明の第2の発明は、好ましくは、前記原子ビーム発生工程が、原子オープンにより原子を蒸発させる原子気体発生工程と、前記原子気体を1つ又は2つ以上のピンホールを通すことによりコリメートし、コリメートされた原子気体にレーザーを照射することにより原子気体の広がり角を  $1\text{ mrad}$  以下とする原子ビーム取得工程とを含む。

(6) 本発明の第2の発明は、好ましくは、原子ビームの進行方向に対して垂直な面に互いに直交する2本のレーザーを用意し、前記光定在波を、電気光学素子を経た前記2本のレーザーにより得、前記電気光学素子の屈折率を制御することにより、前記光定在波を変化させることにより原子ビームの進行方向を制御する。

(7) 本発明の第3の発明は、気体原子からなる原子ビームを生成する原子ビーム生成手段と、前記原子ビーム生成手段により生成された原子ビームにレーザーを照射し、原子ビームの広がり角を制御する4本のレーザーと、前記原子ビームが進行する空間の一部に光定在波を形成し、原子ビームの進行方向を制御する2本のレーザーと、前記原子ビームの進行方向を制御するレーザーの位相を制御し、原子ビームの進行方向を制御する電気光学素子と、前記電気光学素子に加える電圧を制御し、前記電気光学素子の屈折率を制御する電気光学素子駆動装置と、前記電気光学素子駆動装置を制御する制御装置とを具備する原子リソグラフィ装置である。

【0016】

**【発明の実施の形態】**

以下に、この発明の実施の形態を図面に基づいて詳細に説明する。第1の実施形態を、図2を用いて説明する。

**【0017】**

図2は、真空チャンバー100内で行なう本発明の原子リソグラフィの概略を示す模式図である。この実施形態における本発明の原子パターン作成装置は、原子気体を発生させる手段であり、ピンホールを有する原子オープン10と、原子オープン10から放出された原子気体をコリメートし原子ビームとするピンホールを有するコリメータ2と、原子ビームを制御するレーザー光21～24とからなる原子ビーム発生手段と、原子ビームの進行方向を制御するレーザー光25、26と、レーザーの位相を制御し、原子ビームの進行方向を制御する電気光学素子31、32と、電気光学素子に加える電圧などを制御する電気光学素子駆動装置33、34と、電気光学素子駆動装置を制御するコンピュータなどの制御装置35、36とを含み、原子オープン10から放出された原子気体が基板1上に堆積し、原子パターンが描写される。

**【0018】**

(真空チャンバー)

真空チャンバー100としては、公知のチャンバーを用いることができる。真空チャンバー内の真空度としては、高真空又は超高真空であることが好ましく、例えば、 $1.0 \times 10^{-8}$  Pa以下が好ましい。

**【0019】**

(原子オープン)

原子オープン10としては、描画対象となる原子の熱原子ビームを発生させるのに十分な蒸気圧をオープン内で達成できるまで原子を高温に保っておくことができ、ピンホールを有するものであれば、特に限定されるものではない。

**【0020】**

(ピンホール)

コリメータのピンホール2としては、原子オープン10から放出された原子気体をコリメートできるものであれば、特に限定されるものではない。コリメータ

のピンホールの直径としては、1 mm以下が好ましく、0.5 mm程度であればより好ましい。

#### 【0021】

(レーザー)

本発明に用いられるレーザーとしては、例えば、固体レーザー、半導体レーザー (LD)、液体レーザー (色素レーザー)、気体レーザーなどが挙げられる。

#### 【0022】

固体レーザーとしては、ルビーレーザー (波長 690 nm)、ガラスレーザー (波長 1060 nm)、YAGレーザー (波長 1064 nm)、チタンサファイアレーザー (波長 700~1000 nm) およびこれらの2次、3次、及び4次の高調波が一般的に挙げられる。

#### 【0023】

半導体レーザーとしては、ガリウム砒素系、インジウムガリウム砒素系、インジウムガリウム砒素リン系など種々の半導体レーザーを一般的に用いることができる。

#### 【0024】

色素レーザーとしては、種々の色素レーザーを一般的に用いることができる。

気体レーザーとしては、He-Neレーザー (632.8 nm)、アルゴンレーザー (510 nm)、フッ素-アルゴンエキシマレーザー (193 nm)、フッ素クリプトンエキシマレーザー (249 nm)、フッソクリプトンエキシマレーザー (351 nm)、塩素アルゴンエキシマレーザー (175 nm)、塩素クリプトンエキシマレーザー (222 nm)、塩素キセノンエキシマレーザー (308 nm)、臭素キセノンエキシマレーザー (282 nm)などを一般的に用いることができる。気体レーザーとしては、例えばアルゴンイオンレーザーが好ましい。

#### 【0025】

本発明においては、これらのレーザーを1種又は2種以上を組み合わせることも可能であり、気体レーザー、色素レーザー、固体レーザー単独、又は気体レーザーと色素レーザーとを組み合わせることもできる。以上に述

べたレーザーのうちで、実際の使用に当たっては単一周波数で連続波発振動作を行うレーザーが好ましい。

ただし、これらのレーザーのうち、具体的にどの種類のレーザーを使用するかは、個々のレーザー装置が持つ特性（発振波長特性、発振スペクトル特性、光出力パワー値）などを総合的に検討して、所望の特性を持つパターンの描画に最も適した性能を有するレーザーを選択して使用する。

#### 【0026】

レーザー光 21～24 の強度としては、出力値として 1 mW 以上あることが望ましい。

レーザー光 21～24 の周波数としては、制御対象となる原子がレーザー冷却されるのに必要な周波数特性を備えているものとする。一般にレーザー冷却は制御対象となる原子の電子準位間の遷移を利用して行われる。例えば、文献（清水富士夫「原子のレーザー冷却とその周辺技術」（応用物理第 60 巻、第 9 号、864～874 頁、1991 年）の内容に従って、実際に制御しようとする原子についてレーザー冷却が適応できる遷移（レーザー冷却遷移）を決定できる。レーザー光 21～24 の周波数はレーザー冷却遷移に共鳴する周波数を中心に数十メガヘルツ程度の範囲で自由に同調できることが望ましい。

#### 【0027】

（原子ビームを制御するレーザー）

原子ビームを制御する 4 本のレーザー光 21～24 の強度は、少なくとも原子ビームを構成する原子のレーザー冷却遷移の飽和強度程度であり、それ以上の強度であることが好ましい。4 本のレーザー光 21～24 と原子との相互作用長は少なくとも 1 cm 以上ある。また、レーザー光 21～24 の周波数は、原子のレーザー冷却遷移の共鳴周波数から当該遷移の自然幅（半値半幅）分だけ負に離調させる。例えば、原子として Cr を選択した場合は、波長が 425 nm 程度のレーザーを、周波数を 5 MHz 程度負離調しておく。そのうえで、レーザー光の周波数は文献（W. Z. Zhao et al., Rev. Sci. Instrum. 69 (1998) pp.3737-3740）に記載されている手法を用いて安定化させておくことが望ましい。これら 4 本のレーザーは、同一平面かつ 90 度ごとにレーザーが放射されるように設定され

ることが好ましい。

#### 【0028】

(原子ビームの進行方向を制御するレーザー)

原子ビームの進行方向を制御するレーザー光 25、26 のパワー値としては、少なくとも 10 mW 以上が好ましく、大きな値であるほど好ましい。レーザー光 25、26 の周波数値は基板上に形成されるパターンの周期を決定するので、実際の用途に応じた値を、レーザー装置の適切な選択によって用意する。これら 2 本のレーザーは、同一平面かつ 90 度ごとにレーザーが放射されるように設定される。また、やはり、レーザー光の周波数は文献 (W. Z. Zhao et al., Rev. Sci. Instrum., 69 (1998) pp.3737-3740) に記載されている手法を用いて安定化させておくことが望ましい。

#### 【0029】

(電気光学素子)

電気光学素子 31、32 は、原子ビームの進行方向を制御するレーザー 25、26 の位相を制御し、原子ビームの進行方向を制御することができるものであれば、特に限定されるものではないが、上記で使用する光の波長で素子中の光透過率ができるだけ高い材質のものを選択することとし、透過率は 95 % 以上あることが望ましい。電気光学素子 31、32 としては、ポッケルス効果、カー効果などの電気光学効果を奏する素子が挙げられる。なお電気光学効果とは、電場の作用で物質の屈折率が変化する効果を意味し、屈折率の変化が電場に比例する場合の電気光学効果をポッケルス効果、屈折率の変化が電場の 2 乗に比例する場合をカー効果と呼ぶ。カー効果を奏する電気光学素子としては、例えば液体のニトロベンゼンを用いたカーセルなどが挙げられる。ポッケルス効果を奏する電気光学素子としては、ADP、KDP などの結晶からなるものが挙げられる。

#### 【0030】

電気光学素子 31、32 としては、例えば、(米国) ニューフォーカス社製モデル 4002 (登録商標) を用いることができる。

#### 【0031】

(電気光学素子駆動装置)

電気光学素子駆動装置は、電気光学素子に所望の屈折率変化を生じさせるためのものであり、必要な電圧を電気光学素子に供給することを目的とする。これは、公知のものが使用可能であるが、。外部信号の入力によって出力電圧値を制御できる機能を自ら有する装置であるか、もしそのような機能を有していない場合には同等の機能を有するまでに新たな電気回路を必要に応じて付与しておくことが好ましい。電気光学素子駆動装置 3 3, 3 4 としては、例えば、市販のファンクションジェネレーター（ケンウッド社製 F G 2 7 3 A）と増幅器（ドイツ・Piezomechanik社製 S V R 1 0 0 0 など）を組み合わせたものを用いることができる。また、複雑な模様のパターニングにはコンピュータからのデジタル信号を市販の D/A コンバーターでアナログ信号に変換した後、前述の増幅器で増幅した信号を使うこともできる。

### 【0 0 3 2】

（制御装置）

制御装置 3 5、3 6 としては、電気光学素子を制御するものであれば特に限定されるものではなく、例えば、公知のコンピュータなどを用いることができる。また、図中で制御装置 3 5、3 6 とは別々に設けられているが、制御装置の有する能力に応じて 1 台で図 2 の制御装置 3 5、3 6 として機能させても差し支えない。

### 【0 0 3 3】

（原子構造物の製造方法）

以下、本発明の原子リソグラフィ装置を用いた、基板上への原子構造物の描画方法（原子構造物の製造方法）を説明する。

なお、原子構造物とは、基板上に堆積された特定の構造をもつ原子（分子）の集合物を意味する。

まず、原子オープン 1 0 に描画対象となる物質を入れ、加熱することにより物質を蒸発させる。通常はクヌーセンセルなどの加熱蒸発装置が使用される。前記物質としては、C r、A l、I n、あるいは S i 等があげられる。例えば、加熱の程度としては、その物質の蒸気圧が 0. 1 T o r r 相当以上になる温度まで加熱すればよい。また、基板 1 上に蓄積する構造物の生成速度から、加熱の温度・



時間などの条件を決定しても良い。

#### 【0034】

原子オープン10のピンホール（図示せず）から噴出した原子気体を、コリメータのピンホール2に通し、当該ピンホール2から出た原子気体を原子描画用原子源の原子ビームとする。なお、原子オープンとコリメータのピンホール2は、蒸発した原子の飛散する方向と同軸上に並べられている。この2つのピンホールにより原子気体がコリメートされる。原子オープン及びコリメータに設置される2つのピンホールの直径と間隔は、原子ビームの広がり角が $10\text{ mrad}$ 以下となるように設定することが最低限必要で、 $5\text{ mrad}$ 程度であればより好ましい。この特性を実現しようと思えば、2つのピンホールの直径を $0.5\text{ mm}$ 、ピンホール間隔を $20\text{ cm}$ とする。

原子ビームを遮断するためのシャッターは、原子描画時間の調節に使用し、これにより基板上で生成される原子構造物の高さ、または母体構造物中における照射原子の濃度を制御することができる。

#### 【0035】

なお、上記の例では、熱原子線を用いて作成された原子ビームを利用したが、YAGレーザー光を使ったアブレーションなど公知の気体原子からなる原子ビームを生成する原子ビーム生成手段を用いて原子ビームを作成することは、本発明の別の実施の態様である。

#### 【0036】

次に4つのレーザー21～24を用いて、上記で達成した値よりも原子ビームの広がり角をさらに狭く制御する。この制御方法としては、一般に知られているように光モラセスを用いた方法が挙げられる（例えば、B. Sheehy, S. Q. Shang, P. van der Straten, H. Metcalf ; Chem. Phys. 145 (1990) 317-325）。

#### 【0037】

レーザー光21～24によって制御される原子ビームの広がり角としては、 $1\text{ mrad}$ 以下であり、 $500\text{ }\mu\text{rad}$ 以下であればより好ましく、結果的に原子ビームの横方向（原子ビームの進行方向に対して垂直な方向）の運動エネルギーが温度に換算して、ドップラー冷却限界温度にまで抑制できていることが最も好

ましい。レーザー光 2 1 ~ 2 4 のレーザー光強度、レーザー光周波数、そして光モラセスの相互作用長は、ドップラー冷却限界温度を達成できるよう、それらの値を相互にかつ精密に調整する。

### 【 0 0 3 8 】

以上のようにして得られたコリメート原子ビームは、レーザー光 2 5、2 6 によって構成される 2 次元光定在波の場によって、進行方向が制御される。

レーザー光 2 5、2 6 の両方は、電気光学素子 3 1、3 2 を経由し、x 及び y 方向に往復することによって両方向に光定在波を形成している。電気光学素子の 2 5 及び 2 6 の片側の端面（原子ビームとレーザー光が相互作用する位置よりも遠い側）は、レーザー光 2 5 及び 2 6 の波長において 9 9 % 以上の反射率を達成するようなコーティングを施すことが好ましい。また、もう一方（原子ビームとレーザー光が相互作用する位置に近い側）の端面は、レーザー光 2 5 及び 2 6 の波長において無反射コーティングを施すことが好ましい。以下、原子ビームの進行方向が制御される理由を説明する。

### 【 0 0 3 9 】

光定在波の存在する空間は、その光が持つ波長の半分の周期で空間的に光強度が変化している。そしてそのような空間に、原子ビームが導入されると光強度の大きな場所（腹）か、または小さな場所（節）に向かう力を受ける。原子ビーム中の原子は、例えばレーザー光の周波数が原子のある光学遷移の共鳴周波数に対して正に離調されていれば節へ向かう光双極子力を受ける。逆に、負に離調されていれば腹へ向かう光双極子力を受ける。従って、原子ビーム中の原子は光定在波中を通過するあいだに光の離調の符号に応じて、光定在波中の節または腹に集められて、空間的に半波長周期で原子密度の粗密が形成される。光の周波数離調は、原子ビームを構成する原子種がもつ電子準位間の遷移周波数を基準とすることができる。レーザーの周波数離調量によって、生成される原子パターンの周期を変化させることができる。逆に、レーザー周波数は、基板上で描画される原子パターンの周期の値を決定した上で、その周期の値の 2 倍の大きさに相当する波長によって決定しても良い。例えば、周期 2 0 0 nm の周期構造物を得ようとする場合には、波長 4 0 0 nm のレーザー光を使用すれば良い。周波数離調量の値

は光双極子力の周波数依存性から+500MHzから+3GHzの範囲で設定できることが望ましい。一方、周波数離調によって双極子力ポテンシャルの値も変化するため、用途に応じて周波数離調値を制御することが好ましい。また、レーザー25、26は、発振スペクトル線幅の狭いレーザー光でなくてはならず、少なくともスペクトル幅が10MHz以下であることを必要とする。このためにレーザー光源は連続波(cw)かつ単一周波数発振動作を行うレーザーを使用する。

#### 【0040】

レーザー25、及びレーザー26の光強度、ビーム径、周波数離調量をそれぞれ等しくし、それぞれの値は基板上での原子リソグラフィーの分解能が最も高く原子構造物を描画できるように制御することが好ましい。また、レーザー25、26の光強度及び周波数離調量は、生成された光定在波が原子ビーム中の原子に作用する双極子ポテンシャル値に関してx及びy方向（原子の進行方向に対して垂直方向）のコリメート後の原子の運動エネルギーより大きくなるよう、即ち下記式1を満足するように設定することが好ましい。

#### 【0041】

##### 【式1】

$$\frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 < \frac{1}{2} \cdot \hbar \cdot \Delta \cdot \ln \left( 1 + \frac{I}{I_0} \cdot \frac{\bar{A}^2}{\bar{A}^2 + 4\Delta^2} \right) \quad \dots \text{式1}$$

式1中、mは原子の質量、vはレーザー光21～24によってコリメートされた原子の横方向速度、Δは周波数離調量の絶対値である。Iは光定在波の光強度、I<sub>0</sub>は離調の基準にとった光学遷移の飽和強度、Γはその遷移の自然幅である。

#### 【0042】

このようにして、基板1上にはレーザー光25、26の波長をλとすると、λ/2の周期のドットが形成されることとなる（例えば、A.S.Bell, et al., "Atomic Lithography", Microelectronic Engineering 41/42, 587-590, 1998（非特許文献2）参照）。レーザー光25、26が原子と相互作用する領域と、基板との間の距離は、あらかじめ基板上で生成される構造物の描画分解能が最も高くなる距離を求めておき、その値に設定することが好ましい。

## 【0043】

次に、電気光学素子 31、32 に電圧を加え、屈折率を変化させることによって光定在波の節（又は腹）の位置を制御する。

電気光学素子の長さは一定であるから、電気光学素子の屈折率が変化すると、電気光学素子から出射するレーザー光の位相がずれる。これによって、光定在波の節（又は腹）の位置が変化し、原子ビームの進行方向が変わる。したがって、電気光学素子 31、32 に印加する電圧を制御することで、基板 1 上に形成されるドットの位置を制御することができるから、基板 1 上に堆積する原子構造物の描画パターンを制御することができる。例えば、電気光学素子 31 として KDP 結晶を電気光学素子に使用した場合、電圧が印加されていないときの KDP 結晶の屈折率（ $n_0$ ）は 1.5 であるが、電圧を印加すると屈折率変化は次の式 2 で与えられる。

## 【0044】

## 【式 2】

$$n = n_0 - \frac{n_0^3}{2} \cdot r \cdot E \quad \dots \text{式 2}$$

ここに、 $r$  は物質に固有の定数であり、KDP 結晶の場合、 $10.6 \times 10^{-12}$  (m/V) という値をとることが知られている。また  $E$  は電圧印加によって電気光学素子内に発生した電場の強さを示す。

## 【0045】

電気光学素子の長さを  $L$  とすると、電気光学素子 31 の外側（真空側）に生成される光定在波について、電圧印加時に光定在波の位相は電圧を印加しなかったときに比べて、式 3 の通り変化する。

## 【0046】

## 【式 3】

$$\Delta\phi = \frac{n_0^3}{2} \cdot r \cdot E \cdot \frac{2\pi}{\lambda} \cdot L \quad \dots \text{式 3}$$

## 【0047】

従って、印加電圧を制御してやれば、それに応じて位相変化を生じさせることが

できる。印加電圧の上限 ( $V_u$ ) は式 3 で与えられる位相変化が  $\pi$  になるとき、即ち、以下の式 4 である。

【0048】

【式 4】

$$V_u = E \cdot L = \frac{\lambda}{n_0 \cdot r} \quad \dots \text{式 4}$$

【0049】

この電圧印加時には光定在波の節（または腹）の位置は波長の半分の距離だけ移動する。KDP の長さ 10 mm、使用波長 400 nm の場合には、[式 4] で与えられる印加電圧上限値 ( $V_u$ ) は 5.9 kV になる。

【0050】

図 3 に、KDP 結晶（長さ 10mm）の内・外で発生する光定在波の強度分布を、印加電圧 0V と 5.9 kV のもとで計算した結果を示す。ここで  $x=0$  を素子端面（全反射面）とし、素子外で屈折率は 1 である。定在波の節（又は腹）のそれぞれの位置は、電気光学素子への電圧印加によって素子外（真空中）で同じ距離だけ同時に変化する。これは電気光学素子への印加電圧に追随するため、低速（殆ど静止）から高速（光速近く）にいたる幅広い速度で制御が可能である。例えば、基板 1 上でドットが光定在波の節の位置に形成される条件下で、図 2 中の電気光学素子 31 に印加する電圧を原子の堆積速度に比べてゆっくりと連続的に変化させれば、節の位置が  $x$  方向に関してゆっくりと移動するため、それに伴ってドット形成位置がゆっくりと  $x$  方向にシフトして行く。原子はこのあいだも供給され、堆積し続けている。従って、結果として基板 1 上で  $x$  方向に上記移動量に応じた長さの線が描画される。また、電気光学素子 31 に印加する電圧を原子の堆積速度に比べて急激にステップ状に変化させれば、ドット形成位置が急激に変化する。このため、基板 1 上で  $x$  方向に上記移動量に応じた間隔だけ離れた 2 つのドットが描画される。これら 2 つの手法を組み合わせることで、 $x$  方向に任意の長さ、間隔で線状構造物を基板 1 上に描画することができる。電気光学素子 32 を使用し、以上の事柄を基板 1 上で  $y$  方向に関して行うことができる。これらのことから、電気光学素子 31 と 32 を制御することによって、基板 1 上で任意の 2 次元パ

ターンを持つ原子構造物を作製することができる。さらに、印加電圧値によって定在波の節（又は腹）位置制御を精度よく再現できるので、本手法による原子描画位置制御の操作性は良く、信頼性が非常に高いものとなる。

#### 【0051】

基板1上への原子堆積量は堆積時間に応じて決まるため、本発明での任意の2次元パターン生成時において、基板1上で作製される原子構造物の高さも、制御が可能である。即ち、比較的早く電気光学素子に電圧変化を与えることにより、低い構造物を、ゆっくり長時間をかけて電圧変化を与えれば、高い構造物を描画できる。

#### 【0052】

電気光学素子31、32に印加する電圧は、電気光学素子駆動装置33、34により供給される。所望のパターンを描画するために、制御装置1、2により電気光学素子駆動装置33、34が電気光学素子31、32へ供給する電圧量を制御する。

#### 【0053】

電子光学素子31、32は、それぞれx方向及びy方向への原子描画制御に用いることができ、両者は独立に制御できるため、基板1上に任意のパターンを形成できる。

#### 【0054】

本発明が適応できる対象は原子に限らず、光双極子力が作用する粒子一般について拡張することができることは明らかである。例えば分子を基板上に任意パターンで堆積させることが可能である。分子の種類によってレーザー冷却が適応不可能な場合には、図2中の光モラセスによる粒子線コリメートの過程を省き、2つのピンホールだけによって広がり角1 mrad以下の分子ビームを作製することにより、本発明が適用できる対象を広げることができる。

#### 【0055】

上記の説明では、コリメート熱原子ビームを原子源とする場合について述べたが、通常レーザー冷却実験で行われる減速原子ビームや磁気光学トラップから開放された冷却原子を原子源とすることも可能である。この場合、基板表面に垂直

な原子の速度成分の分布が熱原子ビームに比べて  $1/1000$  程度に圧縮されているので、熱原子ビームを使う時に比べて遥かに高い分解能（10 ナノメートル以下）で描画できる。

#### 【0056】

上記の説明においては、単一の原子種からなる原子線について述べたが、上述の実施内容を複数種の原子を対象に行うこともできる。このためには、複数の原子源から発せられる熱原子ビームをコリメートしたあと合成し、光双極子力で運動制御して基板上へ堆積させ、所望の微細パターンを作製する。ただし、使用する原子種に応じて、その遷移周波数や作製するパターン周期などを総合的に勘案し、必要な波長のレーザー光を用意しておくものとする。この際、使用する原子種および光の波長を適切に選択すれば、異なる波長の光で複数の光定在波を形成し、原子種ごとに独立して異なるパターンを描画させたり、パターンを描かずに一様に原子を堆積させたりすることができるので、3次元的に任意のパターニングが可能になる。

#### 【0057】

##### 【発明の効果】

本発明によれば、光の回折限界以下の分解能（荷電粒子線の収束ビーム径以下の分解能）をもった任意のパターンを有する多くの同じ原子構造物を同時に得ることができる。

#### 【0058】

本発明によれば、電子光学素子を用いて位相制御を行ったレーザーを用いることで、基板上に堆積する原子の形状を精密かつ再現性よく制御することを可能とする原子リソグラフィー装置、及び原子リソグラフィー方法（原子構造物の製造方法）を提供することができる。

#### 【0059】

本発明によれば、電子光学素子を用いて基板1上で位置ごとに異なる原子堆積時間を実現することができるから、基板上に堆積する原子の高さを自在に制御することを可能とする原子リソグラフィー装置、及び原子リソグラフィー方法（原子構造物の製造方法）を提供することができる。

**【0 0 6 0】**

また本発明によれば、これまで制御できなかった基板上の原子堆積物の集合様式を制御可能となる。これにより原子堆積物が持つ導電性などの機能を制御することにつながる。

**【図面の簡単な説明】**

**【図 1】** 図 1 は、従来の微小パターンの形成方法の一例を示す概略図である。

**【図 2】** 図 2 は、本発明の原子リソグラフィー装置の一例を示す概略図である。

**【図 3】** 図 3 は、KDP を電気光学素子（長さ 1 mm）として用い、波長 400nm の光で定在波を生成したときに、KDP への印加電圧に応じて、光定在波の節（腹）の位置が x 方向にどう変化するかを示した図である。

**【符号の説明】**

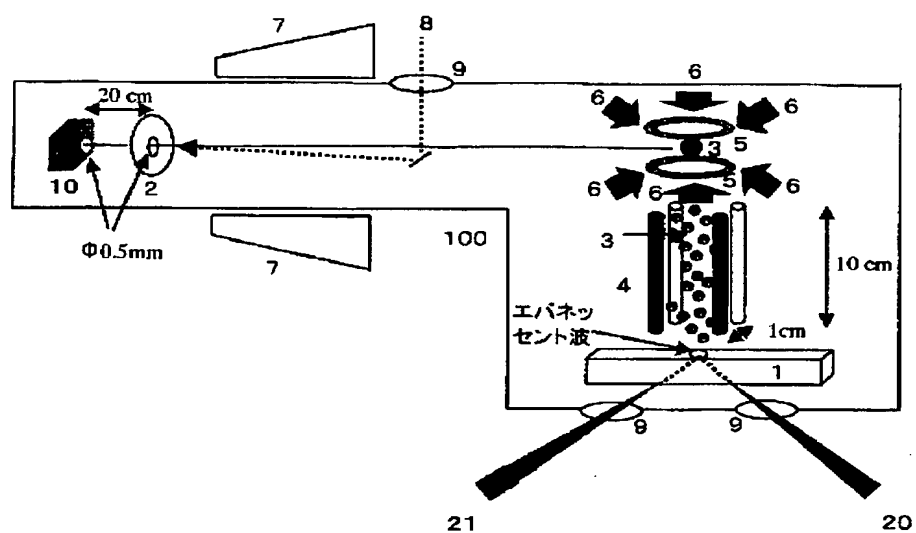
- 1 基板
- 2 ピンホールを有するコリメータ
- 3 冷却原子
- 4 冷却原子ガイド用四重極磁場（磁気トラップ）
- 5 アンチヘルムホルツ型コイル
- 6 磁気光学トラップ用レーザー
- 7 ゼーマン同調減速用ソレノイドコイル
- 8 ゼーマン同調減速用レーザー
- 9 ビューポート
- 10 原子オープン（ピンホール付き）
- 11 出射レーザー
- 12 入射レーザー
- 21～24 原子ビームを制御するレーザー
- 25、26 原子ビームの進行方向を制御するレーザー
- 31、32 電気光学素子
- 33、34 電気光学素子駆動装置
- 35、36 制御装置



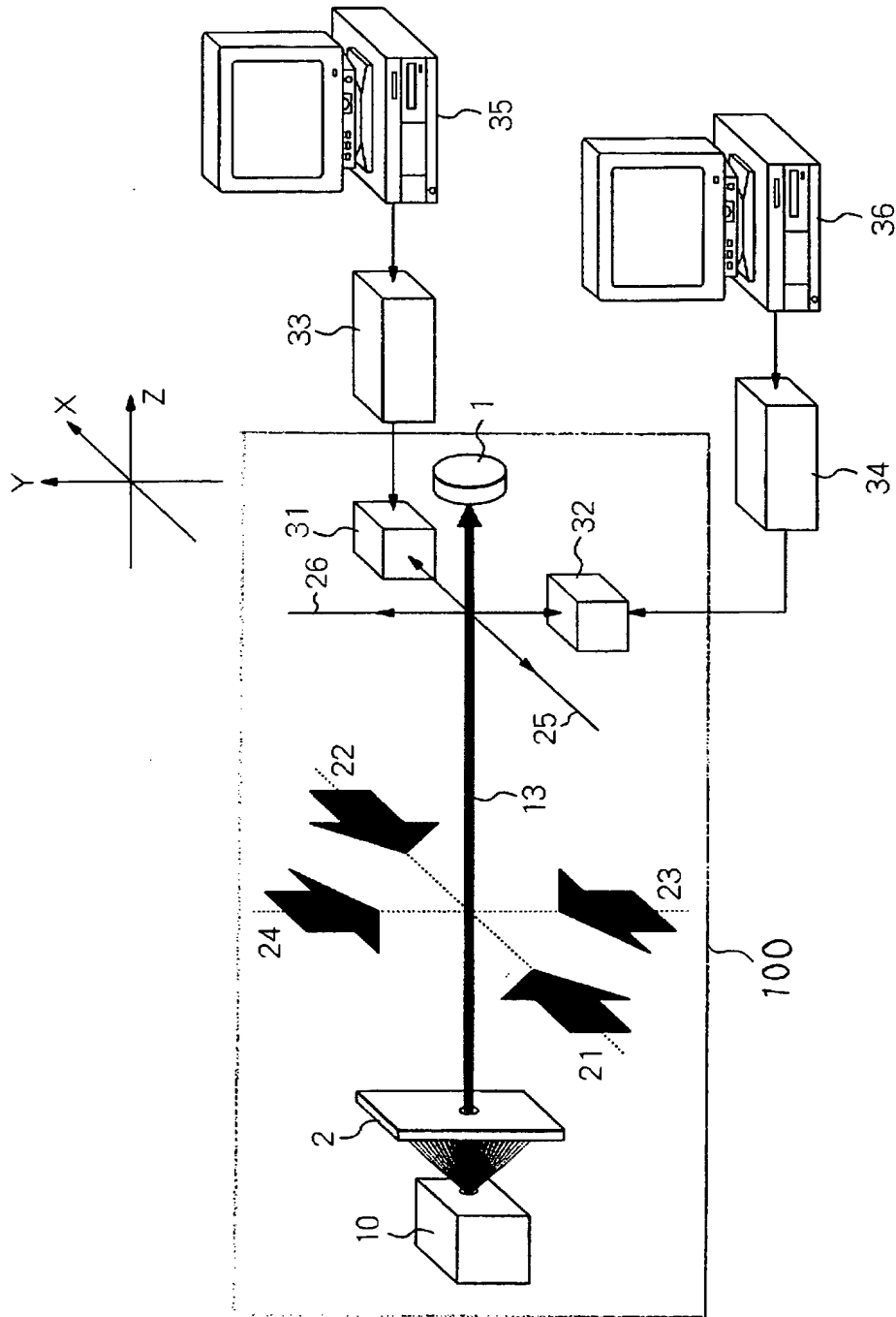
1 0 0 真空チャンバー

【書類名】 図面

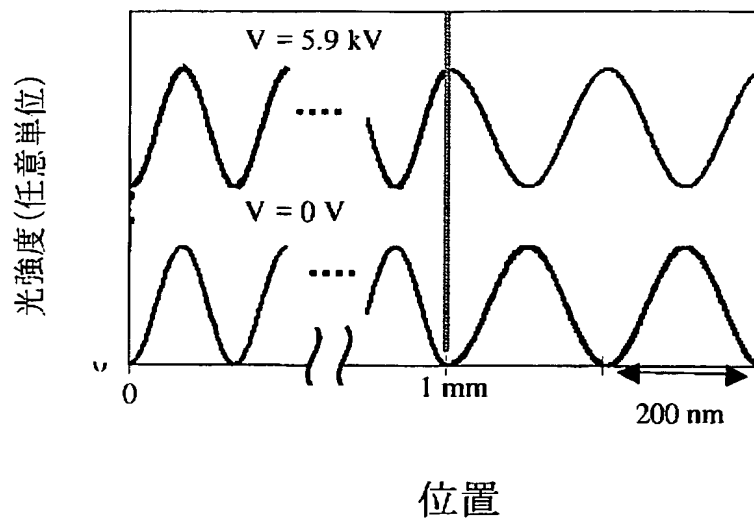
【図 1】



【図 2】



【図 3】



【書類名】 要約書

【要約】

【課題】 光の回折限界以下程度の高い分解能を有する原子リソグラフィ技術を提供し、周期的な自由なパターンを一括して描画することができる微細パターンの形成方法を提供することを目的とする。

【解決手段】 原子ビームに含まれる原子を基板上に堆積させ原子構造物を製造するための原子リソグラフィ装置において、ピンホールを有する原子オープンと、前記原子オープンから放出された原子気体をコリメートし、原子ビームとするピンホールを有するコリメータと、前記原子ビームにレーザーを照射し、原子ビームの広がり角を制御する 4 本のレーザーと、前記原子ビームが進行する空間の一部に光定在波を形成し、原子ビームの進行方向を制御する 2 本のレーザーと、前記原子ビームの進行方向を制御するレーザーの位相を制御し、原子ビームの進行方向を制御する電気光学素子と、前記電気光学素子に加える電圧を制御し、前記電気光学素子の屈折率を制御する電気光学素子駆動装置と、前記電気光学素子駆動装置を制御する制御装置とを具備する原子リソグラフィ装置。

【選択図】 図 2

特願 2 0 0 3 - 0 3 5 3 5 6

出 願 人 履 歴 情 報

識別番号 [ 3 0 1 0 2 2 4 7 1 ]

1. 変更年月日	2 0 0 1 年 4 月 2 日
[変更理由]	新規登録
住 所	東京都小金井市貫井北町 4 - 2 - 1
氏 名	独立行政法人通信総合研究所